基于W-OH的矿区重构冻土阻水层功能评价模拟研究

杨思远， 杨海龙， 杨鹏辉， 张 巍， 张颂扬
（北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘 要： 为缓解高寒矿区扰动土体难以形成冻土带来的不利影响，选取5种W-OH浓度（0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%）喷施于扰动土体底部，重构矿区冻土阻水层，进行抗压试验、入渗试验和模拟降雨试验，分别从物理性能、入渗产流产沙、经济性3个层面进行重构阻水层评价分析，采用层次分析法和专家打分法选出8个影响重构阻水层的主要因子，构建重构阻水层功能评价体系，根据综合评分选出该地区最佳的重构阻水层方案。结果表明：（1）W-OH增强了煤矸石固结体的强度，特别是4.5%W-OH浓度时效果最明显。（2）W-OH浓度上升导致重构阻水层入渗率降低，稳渗历时延长，累计入渗量减少。（3）在降雨条件下，W-OH浓度升高降低了煤矸石固结体的稳定入渗率，增加了平均产流率和平均产沙率，并且平均产流率和平均产沙率都同W-OH浓度、坡度存在正相关关系。（4）4.5%W-OH浓度方案功能综合评分最高，但在实际施工中，4.5%W-OH浓度方案易堵塞喷头，故推荐使用评分次之的3.5%W-OH浓度方案重构矿区冻土阻水层。研究结果可为W-OH在高寒矿区重构冻土阻水层应用提供理论依据。

关 键 词： 煤矸石；W-OH；抗压试验；入渗试验；模拟降雨试验；层次分析法
文章编号： 1000－6060(2025)01－0075－10(0075～0084)

煤矸石是矿区常见的固体废弃物，产生于煤炭开采过程中，占煤炭产出量的10%~15%[1]，具有含碳量低、质地硬、热值低等特点[2]。我国煤矸石累计占地面积70 km^2，堆存达70×10^8 t，且每年增量达1.5×10^8 t[3]。矿区开采产生了诸多生态环境问题[4]，包括煤矸石造成的矿区土体扰动[5]。冻土作为气候变化影响的重要中介，受地形地势、下垫面的影响较大，是不稳定地质体[6]。高寒矿区煤矸石风化层薄、孔隙多、渗透性强，因此在低温季节扰动土体难以形成冻土[7]。

为了缓解青海省海西州天峻县木里矿区的冻土退化问题，本研究提出阻水层重构的方案。在煤矸石剖面合适深度，利用W-OH固化剂喷施于煤矸石，形成一层固结层，调节入渗水分和地表产流的分配，为冻土的形成创造环境。W-OH是一种环境友好型的高分子复合材料，可与水反应形成弹性凝胶体，同时具有固土、保肥、保水和植生等多种性能。低浓度的W-OH水溶液固化前黏度低，渗透性好，与沙、土黏结力强，数分钟即可快速固化，与沙土凝结形成多孔结构固结层[8]，该固结层具有良好的保水、保温、保肥性，可促进植物生长[9]。而且对动植物无任何危害，不会对生态环境造成二次污染，是一种良好的生态恢复新材料[10]。许多学者[11-15]对W-OH在生态护坡、植被恢复、产流产沙、植生固沙、防渗抗冻等方面影响进行了研究，但有关W-OH重构高寒矿区阻水层的研究较少。据此，本研究以木里矿区煤矸石为例，制备5种W-OH浓度（0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%）喷施于煤矸石，重构矿区阻水层。本研究通过层次分析法和专家打分法选取8个指标，探究不同重构模式下阻水层的物理性能、入渗产流产沙及经济性，并构建重构阻水层功能评价体系，根据综合评分选出最佳的重构阻水层类型。

收稿日期： 2024-01-18； **修订日期：** 2024-03-10
基金项目： 国家重点研发计划(2022YFF1302604)；第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0608)资助
作者简介： 杨思远(1998-)，男，硕士研究生，主要从事高寒矿区阻水层重构研究. E-mail: ysy13269025959@163.com
通讯作者： 杨海龙(1966-)，男，博士研究生，副教授，主要从事水土保持、流域治理研究. E-mail: yang_hlong@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用煤矸石来源于青海省海西州天峻县木里矿区，试验煤矸石物理性质如表1所示。试验所用的W-OH固化剂是一种改性亲水性聚氨酯复合材料，呈淡黄色油状体，密度约1.18 g·cm^{-3}，黏度650~700 Pa·s^{-1}（20 ℃），固含量约85%，抱水量40倍以上。W-OH可与任意比例水反应可生成力学性能良好的弹性凝胶体，该凝胶体遇水不再溶解，具有高度安全性。

表1 风化煤矸石物理性质

Tab. 1 Physical properties of weathered coal gangue

物理性质	粒级分布/%						干容重/g·cm^{-3}	天然含水率/%	饱和体积含水率/cm^3·cm^{-3}	饱和渗透系数/cm·min^{-1}	孔隙度/%
	>10 mm	2~10 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.1~0.5 mm	<0.1 mm					
参数	24.23	38.55	6.61	12.56	12.33	5.73	1.62	13.7	0.64	0.119	29

1.2 试验仪器

1.2.1 抗压试验 采用应变控制式无侧限压力仪进行单轴压缩试验，仪器由南京土壤仪器厂生产（图1a）。速率控制在20 mm·min^{-1}，轴向应变加载速率为2.0 mm·min^{-1}。

1.2.2 土柱入渗试验 试验所用的主要仪器设备有马氏瓶和亚克力柱。亚克力柱由内径29 cm、高60 cm的亚克力圆筒制成，底端有排水口，筒底均匀布设有高5 cm的透水砂，上部水流可通过筒底透水砂经底端排水口排出（图1b）。

1.2.3 降雨试验 人工降雨装置由降雨管路、水泵、降雨控制器、喷头、泄压阀、支架和储水箱组成，支架高度可调节，最高6.8 m，降雨强度变化范围20~240 mm·h^{-1}，降雨有效面积12 m^2，降雨均匀度>80%。所用水槽为自行设计制作长宽高为1.2 m×0.5 m×0.15 m，可调节坡度。水槽设有三角形集流口，方便收集径流和泥沙（图1c）。

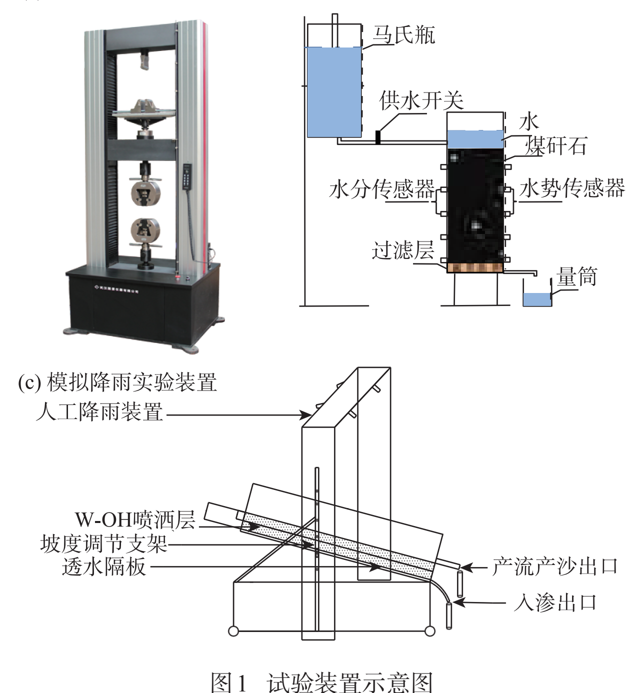


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test devices

1.3 试验方法

制备4种W-OH浓度（1.5%、2.5%、3.5%和4.5%），并以清水（0%W-OH浓度）作为对照。为了让W-OH与煤矸石充分作用，每1 m^{2}喷洒1000 mL W-OH，制备0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%W-OH浓度重构阻水层。

1.3.1 抗压试验 按照自然干容重称取适量风干煤矸石，加入W-OH溶液搅拌均匀后倒入特制压实装置制备试件，试件直径为50 mm、高100 mm，养护72 h。共进行5组试验，每组制备3个平行样，取平均值进行分析。

1.3.2 土柱入渗试验 每5 cm分层装填并刮毛处理，W-OH溶液喷施在距煤矸石表面35 cm深度，制成煤矸石柱。表面铺设网布和大颗粒碎石防止冲刷和损坏，使水分均匀入渗。使用马氏瓶定水头供水，入渗水头10 cm。进行常水头煤矸石柱积水入渗试验，前5 min每30 s一次记录入渗时间、马氏瓶水位，5 min后每5 min记录一次，直至流出稳定水流停止。

1.3.3 模拟降雨试验 设置降雨强度为30 mm·h^{-1}、60 mm·h^{-1}、90 mm·h^{-1}；设计坡度为5°、15°、25°。试验过程如下：先布设透水纱布，填装6 cm煤矸石，控制容重为1.62 g·cm^{-3}在其上喷洒W-OH溶液，等待1 h后回填相同容重煤矸石至12 cm。放置4个雨量

计，保证每次降雨误差不超过5%，均匀度达85%以上。试验过程中，降雨开始后，先记录初始产流时间，待降雨稳定后正式开始试验。记录60 min的泥沙量、径流量和流速。前10 min，每1 min取一次泥沙径流量样，同时用高锰酸钾示踪法测定流速。产流10 min后，每5 min采集一次数据。降雨结束后用量筒测量径流量，静置24 h后倒入铝盒中烘干，然后用0.01 g精度天平称重测量产沙量。

1.3.4 *层次结构模型* 使用层析分析法和专家打分法进行矿区重构冻土阻水层功能评价。针对木里矿区的具体情况，根据指标选择的科学性、综合性、可比性、层次性和可操作性等原则，选取物理性能、入渗产流产沙、经济性3个一级指标作为矿区重构冻土阻水层功能评价体系的评审指标。物理性能包括抗压强度、残余强度、峰值应变3个二级指标；入渗产流产沙包括稳定入渗率、平均产流率、平均产沙率3个二级指标；经济性包括物料价格和施工费用2个二级指标。根据专家打分法征求46位相关专家、工程技术人员的评价意见，对3个一级指标和8个二级指标进行打分确定各指标的重要程度，构造指标判断矩阵、进行单层次排序及其一致性检验、层次总排序及其一致性检验3个步骤后，得到各指标权重的计算结果（表2）。

由于重构阻水层功能评价指标来自不同的方面，实测值的量纲不同且数值差别较大，因此需要对各评价指标进行标准化处理。本研究采用极值法对原始数据进行标准化处理，正相关指标和负相关指标的标准化公式如下：

$$S_1=\frac{\left(S-S_{\min}\right)}{\left(S_{\max}-S_{\min}\right)} \tag{1}$$

$$S_2=\frac{\left(S_{\max}-S\right)}{\left(S_{\max}-S_{\min}\right)} \tag{2}$$

式中：S_1为正相关指标标准化值；S_2为负相关指标标准化值；S为指标原始数值；$S_{\max}$为该指标在所有标准样地中的最大值；$S_{\min}$为该指标在所有标准样地中的最小值。

在本研究的各评价指标中，峰值应变越大说明重构阻水层抗变形性能越差，稳定入渗率越大说明阻水效果越差，平均产流率及平均产沙率越大对水土保持越不利，物料价格和施工费越高经济性越差，因此峰值应变、稳定入渗率、平均产流率、平均产沙率、物料价格、施工费用6个指标为负相关指标，抗压强度和残余强度为正相关指标。各评价指标的原始数值及标准化值如表3、表4所示。

表2 评价指标及其权重

Tab. 2 Evaluation index and its weight

一级指标（权重）	二级指标（权重）
物理性能（0.3119）	抗压强度（0.1681）
	残余强度（0.0927）
	峰值应变（0.0511）
入渗产流产沙（0.4905）	稳定入渗率（0.2888）
	平均产流率（0.0781）
	平均产沙率（0.1235）
经济性（0.1976）	物料价格（0.0988）
	施工费用（0.0988）

2 结果与分析

2.1 W-OH浓度对重构阻水层物理性能的影响

W-OH浓度与抗压强度、残留强度、峰值应变的关系均是正相关。当W-OH浓度为0%时，抗压强度、残余强度、峰值应变均为最小值，分别为8.017 kPa、2.045 kPa、0.709%。当W-OH浓度增加到4.5%时，抗压强度、残余强度、峰值应变均为最大值，分别为250.391 kPa、112.116 kPa、6.124%（图2、表5）。

2.2 W-OH浓度对重构阻水层水分入渗的影响

初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率均随W-OH浓度的增加而减小。在0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%W-OH浓度下，重构阻水层的初始入渗率分别

表3 各评价指标的原始数值

Tab. 3 Original value of each evaluation index

重构阻水层	抗压强度 /kPa	残余强度 /kPa	峰值应变 /%	稳定入渗率 /mm·min^{-1}	平均产流率 /mm·min^{-1}	平均产沙率 /g·m^{-2}·min^{-1}	物料价格 /元·m^{-2}	施工费用 /元·m^{-2}
0%W-OH浓度	8.017	2.045	0.709	0.399	0.359	1.136	0.5	1.375
1.5%W-OH浓度	73.267	24.240	2.650	0.275	0.473	1.463	0.7	2.292
2.5%W-OH浓度	136.131	48.190	4.240	0.199	0.532	1.689	0.9	4.584
3.5%W-OH浓度	196.030	77.950	5.280	0.211	0.574	1.941	1.1	6.876
4.5%W-OH浓度	250.391	112.116	6.124	0.154	0.623	2.195	1.3	9.168

表4 各评价指标的标准化值

Tab. 4 Standardized value of each evaluation index

重构阻水层	抗压强度/kPa	残余强度/kPa	峰值应变/%	稳定入渗率/mm·min^{-1}	平均产流率/mm·min^{-1}	平均产沙率/g·m^{-2}·min^{-1}	物料价格/元·m^{-2}	施工费用/元·m^{-2}
0%W-OH浓度	0.032	0.018	1.000	0.387	1.000	1.000	1.000	1.000
1.5%W-OH浓度	0.293	0.216	0.268	0.562	0.758	0.776	0.714	0.600
2.5%W-OH浓度	0.544	0.430	0.167	0.776	0.674	0.672	0.556	0.300
3.5%W-OH浓度	0.783	0.695	0.134	0.733	0.624	0.585	0.455	0.200
4.5%W-OH浓度	1.000	1.000	0.116	1.000	0.576	0.518	0.385	0.150

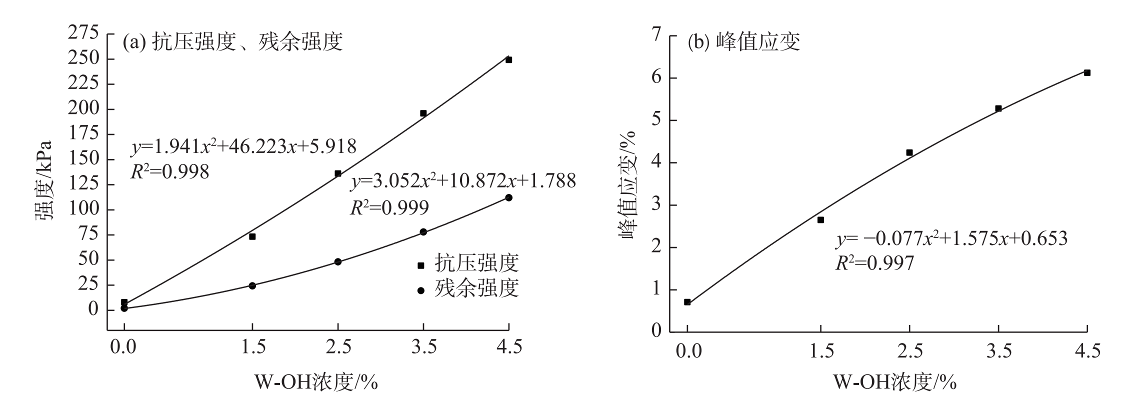


图2 抗压强度、残余强度、峰值应变随W-OH浓度的变化

Fig. 2 Change of compressive strength, residual strength, and peak strain with W-OH concentrations

表5 不同W-OH浓度重构阻水层的物理性能

Tab. 5 Physical properties of reformed waterproof layer with different W-OH concentrations

重构阻水层	抗压强度/kPa	残余强度/kPa	峰值应变/%
0%W-OH浓度	8.017	2.045	0.709
1.5%W-OH浓度	73.267	24.240	2.650
2.5%W-OH浓度	136.131	48.190	4.240
3.5%W-OH浓度	196.030	77.950	5.280
4.5%W-OH浓度	250.391	112.116	6.124

为0.892 cm·min^{-1}、0.882 cm·min^{-1}、0.860 cm·min^{-1}、0.806 cm·min^{-1}、0.773 cm·min^{-1}。其中，0%W-OH浓度的稳定入渗出现在80 min之后，稳定入渗率达到0.130 cm·min^{-1}。其他W-OH浓度重构阻水层在85 min、185 min、260 min、345 min后分别达到稳定入渗，稳渗率依次为0.108 cm·min^{-1}、0.028 cm·min^{-1}、0.014 cm·min^{-1}、0.009 cm·min^{-1}。观察到W-OH浓度越高，达到稳定入渗所需的时间越长，表明其阻挡水分入渗的能力越强。相应的，非稳定入渗时间延长，稳定入渗率降低，入渗量也随之减少。0%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%W-OH浓度重构阻水层的平均入渗率分别为0.230 cm·min^{-1}、0.204 cm·min^{-1}、0.096 cm·min^{-1}、0.067 cm·min^{-1}、0.030 cm·min^{-1}（图3）。

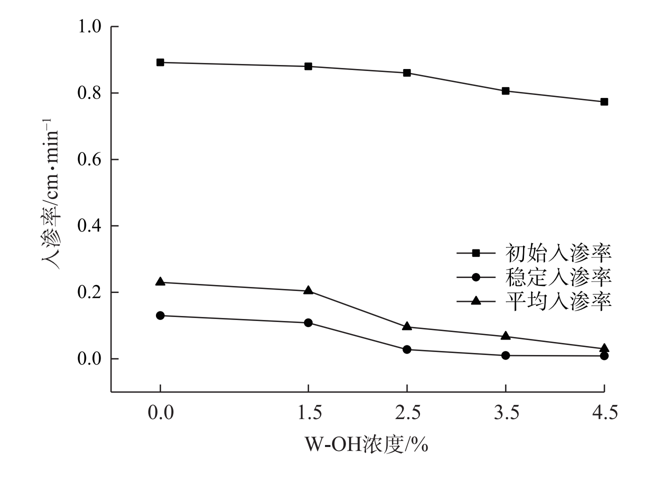


图3 不同W-OH浓度重构阻水层入渗参数

Fig. 3 Infiltration parameters of reformed waterproof layer with different W-OH concentrations

2.3 W-OH浓度对重构阻水层产流、产沙的影响

2.3.1 坡面稳定入渗率特征 在同一降雨强度条件下，不同坡度稳定入渗率均与W-OH浓度满足二次函数关系，整体呈现随W-OH浓度增加而降低的趋势，最大稳定入渗率均出现在0%W-OH浓度条件下，最小稳定入渗率均出现在4.5%W-OH浓度条件下。在30 mm·h^{-1}降雨强度时，5°、15°、25°坡度最大稳定入渗率分别为0.399 mm·min^{-1}、0.325 mm·min^{-1}、

0.278 mm·min^{-1}，其中15°坡度较5°坡度减小了18.9%，25°坡度较15°坡度减小了14.6%（图4a）。在60 mm·h^{-1}降雨强度时，5°、15°、25°坡度最大稳定入渗率分别为0.734 mm·min^{-1}、0.652 mm·min^{-1}、0.585 mm·min^{-1}，最小稳定入渗率分别为0.351 mm·min^{-1}、0.301 mm·min^{-1}、0.188 mm·min^{-1}，15°坡度相较5°坡度减小了14%，25°坡度相较15°坡度减小了36%（图4b）。在90 mm·h^{-1}降雨强度时，5°、15°、25°坡度最大稳定入渗率分别为0.312 mm·min^{-1}、0.269 mm·min^{-1}、0.179 mm·min^{-1}，15°坡度相较5°坡度减小了14%，25°坡度相较15°坡度减小了34%（图4c）。

2.3.2 平均产流率特征 在同一降雨强度条件下，不同坡度的平均产流率与W-OH浓度满足二次函数关系，整体呈现随W-OH浓度增加而增加的趋势。在30 mm·h^{-1}降雨强度时，同一坡度最大平均产流率均出现在4.5%W-OH浓度条件下，且随着W-OH浓度的增加，不同坡度平均产流率的差异逐渐减小，其中0%W-OH浓度在25°坡度的平均产流率较在5°时提升了96.77%，而4.5%W-OH浓度在25°坡度的平均产流率较在5°时仅提升了45.08%（图5a）。

在60 mm·h^{-1}降雨强度时，不同坡度的平均产流率随W-OH浓度的增加变化趋势相似，同一W-OH浓度在不同坡度条件下的平均产流率差异较小，其中最大差异出现在1.5%W-OH浓度条件下，25°坡度较5°坡度提升了24.14%（图5b）。在90 mm·h^{-1}降雨强度时，同一坡度最小平均产流率均出现在0%W-OH浓度条件下，其中5°、15°、25°坡度最小，平均产流率分别为0.904 mm·min^{-1}、0.996 mm·min^{-1}、1.075 mm·min^{-1}，25°坡度平均产流率较15°坡度提升了7.39%，15°坡度平均产流率较5°坡度提升了9.18%（图5c）。

2.3.3 平均产沙率特征 在同一降雨强度条件下，不同坡度的平均产沙率与W-OH浓度满足二次函数关系，整体呈现随W-OH浓度增加而增加的趋势。同一W-OH浓度和降雨强度条件下，平均产沙率与坡度表现出明显的相关性，均随坡度的增加而增大。在同一降雨强度条件下，5°、15°、25°坡度的平均产沙率分别为1.579 g·m^{-2}·min^{-1}、2.465 g·m^{-2}·min^{-1}、3.001 g·m^{-2}·min^{-1}，其中15°坡度的平均产沙率较5°坡度的增量最大，随坡度增加平均产沙率增加56.08%（图6a~c）。而同一坡度条件下，平均产沙率随降雨强度的增大变化明显，其中25°坡度条件下，90 mm·h^{-1}降雨强度的平均产沙率为4.122 g·m^{-2}·min^{-1}，较

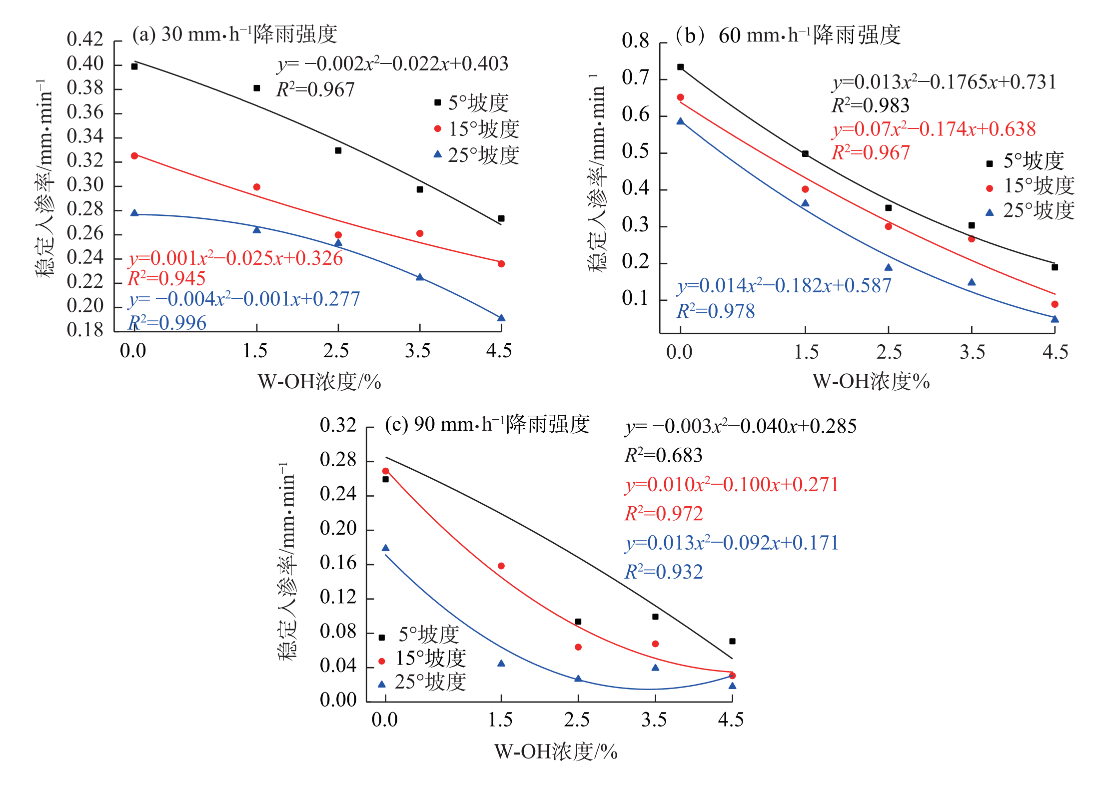


图4 坡面稳定入渗率随W-OH浓度的变化

Fig. 4 Change of stable infiltration rates with W-OH concentrations on slope

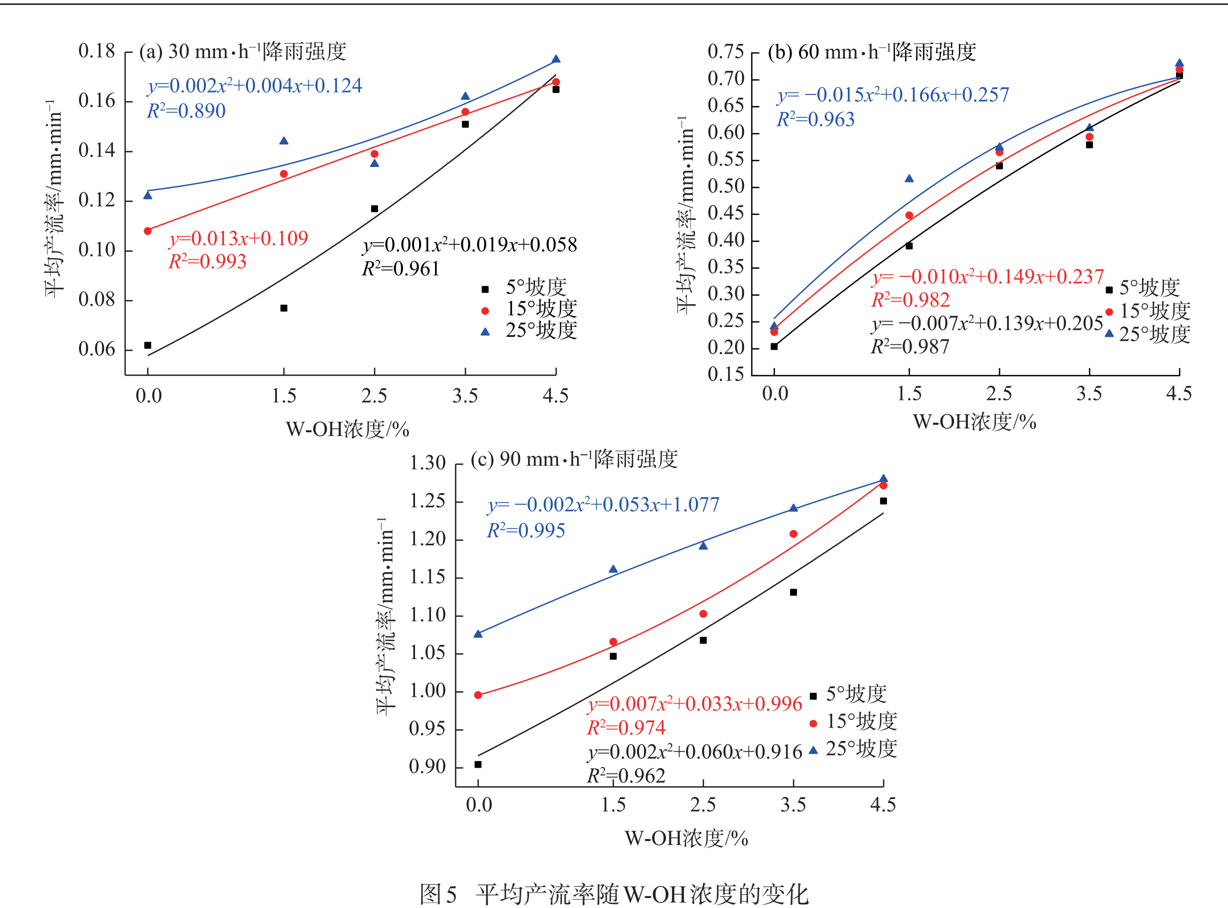


图5 平均产流率随W-OH浓度的变化

Fig. 5 Change of average runoff rates with W-OH concentrations

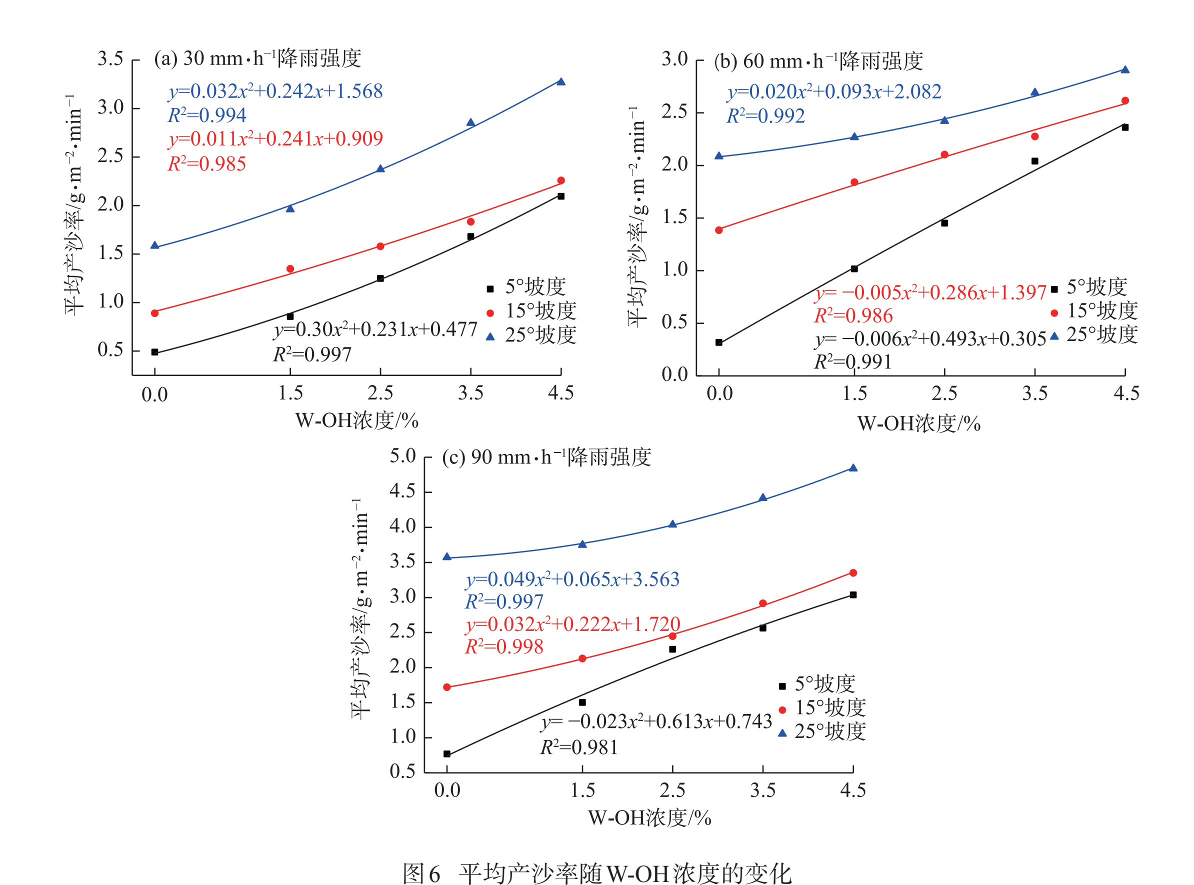


图6 平均产沙率随W-OH浓度的变化

Fig. 6 Change of average sediment yield with W-OH concentrations

60 mm·h^{-1}降雨强度的2.474 g·m^{-2}·min^{-1}增幅最大，为66.59%；15°坡度条件下，90 mm·h^{-1}降雨强度的平均产沙率为2.513 g·m^{-2}·min^{-1}，较60 mm·h^{-1}降雨强度的2.044 g·m^{-2}·min^{-1}增幅最小，为22.94%（图6b~c）。

2.4 重构阻水层功能评分

5种W-OH浓度重构阻水层功能评分顺序依次为：4.5%W-OH浓度（0.7173）>3.5%W-OH浓度（0.6002）>2.5%W-OH浓度（0.5840）>0%W-OH浓度（0.5692）>1.5%W-OH浓度（0.5302）。综合评分越高，重构阻水层功能越好，4.5%W-OH浓度重构阻水层功能最好，3.5%W-OH浓度稍次之，1.5%W-OH浓度最差。

3 讨 论

3.1 W-OH浓度对煤矸石固结体物理性能的影响

随着W-OH浓度的增大，试件的抗压强度、残余强度、峰值应变均逐步变大，这是通过W-OH和水生成的多孔柔性胶凝体填充到煤矸石颗粒孔隙实现的。添加的W-OH浓度越大，其形成的网状结构越加致密，煤矸石颗粒间的粘结性越强，因此试件的抗压强度和残余强度随着W-OH浓度的增加呈现出增大的趋势，这与高运昌等[16]研究结果一致。抗压强度增大的同时试件抵抗形变的能力增强，相同负载下，高抗压强度试件的峰值应变大于低抗压强度试件，因此随着W-OH浓度的增大，峰值应变逐步提升，上述结论说明W-OH能够加强煤矸石固结体的稳定性。

3.2 水分入渗特征

1.5%W-OH浓度与煤矸石混合形成的固化体时，阻水效果不显著。然而，随着W-OH浓度的增加，其阻水效果呈现出显著增强的趋势，这一发现与张璐等[17]的研究结果相符。进一步的统计分析表明，W-OH浓度与煤矸石的入渗率之间存在显著的负相关性。相较于未处理的对照组（0%W-OH浓度），其余4种W-OH浓度重构阻水层（1.5%、2.5%、3.5%、4.5%）的初始入渗率分别减少了1.12%、3.59%、9.64%和13.34%；稳定入渗率分别减少了16.92%、78.46%、89.23%和93.07%；平均入渗率分别减少了11.35%、58.26%、71.02%和86.96%。喷施W-OH后入渗率降低的现象与王欣等[13]的研究结果一致。当考虑累计入渗量时，可以发现，在入渗初期W-OH与煤矸石形成的固结层对煤矸石的入渗能力影响相对较小，而阻水效果的显著性一般发生在处理后的约10 min之后，不同W-OH浓度处理之间开始显现出入渗率的差异，这与魏忠义等[18]的研究结论相吻合。

3.3 W-OH浓度对坡面产流、产沙的影响

不同坡度条件下，稳定产流率随W-OH浓度增加而增大，这是因为W-OH使煤矸石的渗透性能降低，W-OH浓度越高，对坡面渗透性能降低越明显，导致同一降雨强度条件下稳定入渗率降低，根据水量平衡，入渗量小，降雨量大部分转化为坡面径流，产流率增大，这与洪斌等[19]研究的结果一致。相同降雨强度条件下，平均产沙率与坡度表现出明显相关性，这是因为坡度增大会引起入渗率减小，坡面径流量增大，同时，坡度越大其切向力越大，土体越不稳定，坡面径流更容易引起侵蚀，导致平均产沙率增大[20]。在同一坡度条件下，平均产沙率与降雨强度呈现正相关关系[21-23]，这是因为降雨强度大，雨滴击溅煤矸石能量大，容易造成击溅侵蚀，且降雨强度增大使坡面径流增强、运移能力增强，更容易造成侵蚀。

3.4 重构阻水层的功能评价和选取

本研究使用层析分析法进行高寒矿区重构冻土阻水层功能评价，得出4.5%W-OH浓度重构阻水层功能最好，3.5%W-OH浓度稍次之，1.5%W-OH浓度最差。已有一些关于不同W-OH浓度喷涂效果的研究，吴智仁等[24]研究认为W-OH浓度控制在2%~7%便可满足通常的固土、固沙要求，这与本研究结果比较吻合。王黎军[15]对砂粒含量达到50%以上，粉粒含量在46%左右，黏粒小于1%的砂土土样研究发现，7%和10%浓度W-OH对固结层的形成效果比5%浓度的好。这可能是因为本研究煤矸石孔隙度（29%）和常见砂土孔隙度（39%~44%）[25]存在较大差异，砂土土样孔隙度较大，故需要更高的W-OH浓度来提供更大的黏结力。在实际施工中，W-OH浓度的选取还需要落实到具体的工程项目，本研究所属项目已在青海省海西州天峻县木里矿区开展施工，施工费用包括W-OH成本、喷涂人工工资、运费（按500 km计：3元·km^{-1}·t^{-1}）、动力燃油及其他、施工管理费、税金等，总成本为5~13元·m^{-2}，由于不同W-OH浓度重构阻水层施工中所使用W-OH的量不同，施工费用也有所增减，其中3.5%W-OH浓度方案为12.5元·m^{-2}，4.5%W-OH浓度方案为13元·m^{-2}，两者相差不大。结合实际施工情况，发现4.5%W-OH浓

度方案极易使喷头堵塞，极大延缓施工进度，而3.5%W-OH浓度方案则没有此问题，考虑到经济性推荐用3.5%W-OH浓度方案重构矿区冻土阻水层，并在以后的施工中改进喷头设计以适应高W-OH浓度喷洒。

4 结 论

（1）W-OH可以在一定程度上提高煤矸石固结体的物理性能，并且W-OH浓度越高提升的程度越大，根据试验结果，4.5%W-OH浓度的物理性能较好。

（2）土柱入渗试验中，重构阻水层的初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率均随W-OH浓度的增加而减小。W-OH浓度越高，达到稳渗的历时越长，累计入渗量越少，阻挡水分入渗的作用越强。

（3）模拟降雨试验中，W-OH浓度增加降低了重构阻水层的稳定入渗率，同时增加了平均产流率和平均产沙率，并且W-OH浓度越高，坡度越大，这些影响越显著。

（4）5种W-OH浓度重构阻水层功能得分顺序依次为：4.5%W-OH浓度（0.7173）>3.5%W-OH浓度（0.6002）>2.5%W-OH浓度（0.5840）>0%W-OH浓度（0.5692）>1.5%W-OH浓度（0.5302）。结合实际施工，4.5%W-OH浓度方案易使喷头堵塞，3.5%W-OH浓度方案更适合木里矿区实际情况，故推荐用此方案重构矿区冻土阻水层。

参考文献（References）

[1] Song L, Yu Y, Yan Z, et al. Rapid analysis of composition of coal gangue based on deep learning and thermal infrared spectroscopy[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 16210, doi: 10.3390/su142316210.

[2] 贾敏. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 46-52. [Jia Min. The current situation research on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(4): 46-52.]

[3] Feng Y, Shi L, Ma D, et al. Road performance evaluation of unburned coal gangue in cold regions[J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13915, doi: 10.3390/su151813915.

[4] 孟宪文, 曹君, 薛占金. 黄土高原矿区生态系统服务价值的时空变化——以平朔矿区为例[J]. 干旱区地理, 2024, 47(3): 455-464. [Meng Xianwen, Cao Jun, Xue Zhanjin. Spatiotemporal changes of the ecosystem service value for mining area in Loess Plateau: A case of Pingshuo mining area[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3): 455-464.]

[5] Shi F, Li X D, Cao Y, et al. The feasibility analysis of "ecological photovoltaics" from coal gangue mountains[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8761, doi: 10.3390/su15118761.

[6] 苏玥, 张存厚, 阿木尔萨那, 等. 1981—2018年内蒙古典型草原季节性冻土对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 684-694. [Su Yue, Zhang Cunhou, Amuersana, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on a typical steppe of Inner Mongolia during 1981—2018[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 684-694.]

[7] 杨鹏辉, 杨海龙, 杨思远, 等. W-OH固化剂对高寒矿区煤矸石水分入渗的影响及模型拟合[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1542-1554. [Yang Penghui, Yang Hailong, Yang Siyuan, et al. Effect of W-OH stabilizer on water infiltration of coal gangue in high-cold mining areas and model fitting[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1542-1554.]

[8] Kurylyk L B, Macquarrie T K, Mckenzie M J. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 313-334.

[9] McKenzie M J, Voss I C. Permafrost thaw in a nested groundwater-flow system[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 299-316.

[10] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795. [Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2783-2795.]

[11] 余莹莹, 汪永进, 范敬兰, 等. W-OH生态护坡技术在沙土区河道坡面上的应用[J]. 治淮, 2014(8): 31-32. [Yu Yingying, Wang Yongjin, Fan Jinglan, et al. Application of W-OH eco-bank protection technology on river bank slopes in sandy soil areas[J]. Harnessing the Huaihe River, 2014(8): 31-32.]

[12] 李润杰, 郜志勇, 李添萍, 等. 生态恢复新材料特性及在三江源地区沙化地植被修复中的应用[C]//青海省水利水电科学研究所. 全国水土保持生态修复学术研讨会论文集. 西安: 西安理工大学, 2009: 36-42. [Li Runjie, Gao Zhiyong, Li Tianping, et al. Characteristics of ecological restoration new materials and their application in sandy land revegetation in the Sanjiangyuan region[C]//Qinghai Province Water Conservancy and Hydropower Science Research Institute. National Symposium on Ecological Restoration of Soil and Water Conservation Proceeding. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 36-42.]

[13] 王欣, 朱绪超, 梁音, 等. 新型W-OH材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 123-131. [Wang Xin, Zhu Xuchao, Liang Yin, et al. Effects of new polyurethane material (W-OH) on infiltration and runoff and sediment yield of two typical erodible soils in south China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 123-131.]

[14] 郭凯先. W-OH新材料特性及在青海湖周边地区沙化地植生固沙中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(4): 30-32, 37. [Guo

Kaixian. Characteristics of new chemical material W-OH in the re-vegetation of desertified areas around Qinghai Lake and their application[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(4): 30−32, 37.]

[15] 王黎军. W-OH新型防渗材料在高寒干旱区渠道中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2011(4): 28−30, 34. [Wang Lijun. Study on the application of W-OH new anti-seepage material in channels in cold arid regions[J]. Water Saving Irrigation, 2011(4): 28−30, 34.]

[16] 高运昌, 高盟, 尹诗. 聚氨酯固化海砂的静力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊1): 231−236, 244. [Gao Yunchang, Gao Meng, Yin Shi. Experiments on static characteristics of sea sand solidified by polyurethane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (Suppl. 1): 231−236, 244.]

[17] 张璐. 一种亲水反应型聚氨酯在藏北退化草原的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019. [Zhang Lu. Application of a hydrophilic reactive polyurethane in degraded steppe of northern Tibet[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.]

[18] 魏忠义, 王萍, 王秋兵. 膨胀性阻水层对煤矸石山水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 188−191. [Wei Zhongyi, Wang Ping, Wang Qiubing. Effect of expansive water-resisting layer on water infiltration of coal waste[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 188−191.]

[19] 洪斌, 张祖莲, 黄英, 等. 人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 118−123. [Hong Bin, Zhang Zulian, Huang Ying, et al. Erosion characteristics of Yunnan laterite under artificial rainfall conditions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 118−123.]

[20] 李仕华. 梯田水文生态及其效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [Li Shihua. Reaserch on hydro-ecology of terrace and its effect[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.]

[21] 何周窈, 何淑勤, 逯传琦, 等. 大渡河流域干旱河谷区坡面侵蚀产沙与水动力学特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 832−841. [He Zhouyao, He Shuqin, Lu Chuanqi, et al. Study on characteristics of slope erosion sediment production and hydrodynamics in arid valley area of Dadu River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(4): 832−841.]

[22] 朱方方, 秦建淼, 朱美菲, 等. 模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 10−18. [Zhu Fangfang, Qin Jianmiao, Zhu Meifei, et al. Effect of mulch structure on runoff and sediment yield under simulation rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 10−18.]

[23] 王保一, 张荣华, 荆莎莎, 等. 降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 114−120. [Wang Baoyi, Zhang Ronghua, Jing Shasha, et al. Effects of rainfall and slope gradient on runoff and sediment yield of subgrade slope[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(2): 114−120.]

[24] 吴智仁, 杨才千, 吴智深, 等. 基于W-OH有机复合固化材料的新型荒漠化防治及生态修复技术[C]//日本JCK株式会社. 全国水土保持与荒漠化防治及生态修复交流研讨会论文集. 北京: 中国林业与环境促进会, 2009: 244−252. [Wu Zhiren, Yang Caiqian, Wu Zhishen, et al. A new technology for desertification prevention and ecological restoration based on W-OH organic composite solidification materials[C]//JCK Co., Ltd. National Collection of Papers on Soil and Water Conservation, Desertification Control, and Ecological Restoration. Beijing: China Council for the Promotion of Environment and Forestry, 2009: 244−252.]

[25] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [Mao Changxi. Dikes engineering manual[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.]

Function evaluation of reformed waterproof layer over frozen ground in mining area based on W-OH

YANG Siyuan, YANG Hailong, YANG Penghui, ZHANG Wei, ZHANG Songyang

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the challenges associated with forming frozen ground in permafrost mining areas, five concentrations of W-OH (0%, 1.5%, 2.5%, 3.5%, and 4.5%) were applied to the bottom of disturbed soil bodies to reform the waterproof layer at Muli mining area, Qinghai Provinve, China. Compressive tests, infiltration tests, and simulated rainfall tests were conducted to evaluate the reformed waterproof layer from three perspectives: physical performance, infiltration and sediment yield, and cost-effectiveness. Eight key factors influencing the reformed waterproof layer were identified using the analytic hierarchy process and expert scoring method, leading to the development of a functional evaluation system. The optimal scheme for the reformed waterproof layer was determined based on a comprehensive scoring approach. The results indicate: (1) W-OH enhanced the strength of coal gangue solidification, with the most significant improvement observed at 4.5% W-OH concentration. (2) Higher W-OH concentrations decreased the infiltration rate of the reconstructed aquiclude layer, extended the steady infiltration duration, and reduced cumulative infiltration. (3) Under rainfall conditions, increasing the W-OH concentration lowered the stable infiltration rate of coal gangue solidification, increased the average runoff rate, and elevated sediment yield. Besides, the average runoff rate and the average sediment yield are positively correlated with the concentration of W-OH and the slope gradient. (4) While the 4.5% W-OH concentration scheme achieved the highest comprehensive functional score, it posed practical challenges, such as clogging nozzles during application. Therefore, the 3.5% W-OH concentration scheme, which had the second-highest score, is recommended for practical implementation. These findings provide a theoretical basis for applying W-OH to reform waterproof layers over frozen ground in alpine mining areas.

Key words: coal refuses; W-OH; compressive test; infiltration test; simulated rainfall test; analytic hierarchy process